

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

Том VI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

МОСКВА · 1986

ДИСКУССИИ

УДК 550.388 : 629.198.3

ЕЩЕ РАЗ О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЛОКАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ДИСПЕРСИОННЫМ
МЕТОДОМ ПРИ ПОМОЩИ ИСЗ И О НОВЫХ МАКСИМУМАХ
ИОНИЗАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ*К. И. Грингауз, Ю. А. Кравцов, В. А. Рудаков, С. М. Рытов*

Рассматривается вопрос о возможности определения локальной концентрации N_c дисперсионным методом при помощи ИСЗ. Показано, что определение N_c таким методом приводит к недостоверным результатам из-за наличия в ионосфере горизонтальных градиентов ионизации и из-за нестационарности ионосферы.

В связи с этим делается вывод о недостоверности результатов, описанных в ряде работ Я. Л. Альперта и др. Ненадежность этих результатов обусловлена также неправильным методом обработки экспериментальных данных.

В [1] мы обращали внимание на то, что измерения локальной концентрации электронов в ионосфере N_c дисперсионным методом при помощи когерентных радиоволн, излученных с ИСЗ [2—6], не могут дать надежных результатов. Одновременно с [1] были опубликованы возражения Я. Л. Альперта [7] против наших выводов. Однако эти возражения обходят основные аргументы, содержащиеся в [1]. Уже после написания статьи [1] появились работы [8—12], продолжающие [2—6] и содержащие новые результаты, которые, по нашему мнению, также совершенно ненадежны.

В связи с продолжающейся публикацией недостоверных данных о локальных значениях N_c , а также в интересах будущих исследований ионосферы при помощи когерентных радиоволн, излучаемых с ИСЗ, мы считаем необходимым вновь более подробно рассмотреть этот вопрос.

1. Общие замечания

Прежде чем проводить детальное рассмотрение, поясним в общих чертах существо вопроса.

Дисперсионный метод заключается в измерении на Земле вариаций приведенной разности фаз $\delta\Phi$ двух когерентных радиоволн с разными частотами, излученных с объектов, летящих в ионосфере (геофизические ракеты, ИСЗ), или, что то же, — приведенной разности доплеровских смещений частот $\delta\Phi$. Наблюдаемые вариации $\delta\Phi$ зависят от измененной интегральной концентрации на всем пути S распространения волн. Таким образом, измеряя приращение разности фаз $\delta\Phi$ (или $(\delta\Phi)$), можно определить изменение за время наблюдения интегральной концентрации $\int N ds$. Зависимость $\delta\Phi$ от параметров ионосферы в общем случае достаточно сложна. В частных же случаях, пренебрегая отдельными компонентами этой зависимости, можно определить различные параметры ионосферы (см., например, [13—16]). Так, если можно считать, что изменение $\delta\Phi$ вызвано приращением интегральной концентрации только из-за перемещения излучателя на расстояние ΔS (т. е. если можно пренебречь изменениями среды на остальном пути), то дисперсионный метод позволяет определить параметры среды на участке ΔS , а именно, найти среднее на интервале ΔS значение концентрации N_c . Такие условия выполняются, например, при приеме волн, излу-

ченных с вертикально летящей ракетой, движущейся с достаточно высокой скоростью в области ионосферы с не слишком малыми значениями N_c .

При использовании ИСЗ условия эксперимента коренным образом отличаются от опытов с вертикально запускаемыми ракетами. В этом случае локальные значения N_c определяются весьма грубо [17—19]. Это связано не с точностью измерения $\delta\Phi$, а с принципиальными ограничениями точности измерения N_c , обусловленными свойствами ионосферы (ее нестационарностью и наличием горизонтальной неоднородности) и особенностями метода. К этому и относится первая группа наших замечаний.

Вторая группа замечаний относится к интерпретации совокупности значений N_c , полученных дисперсионным методом при помощи ИСЗ. Если даже отвлечься от точности найденных значений N_c и считать их истинными, то, строя значения N_c , полученные вдоль орбиты спутника, в функции от z_c (высоты спутника над Землей), нельзя считать полученный график высотным распределением N_c , поскольку при движении спутника меняется не только высота, но и местное время и геомагнитная широта, от которых сильно зависит значение N_c на данной высоте. Например, в работах [8, 9] при каждом пролете спутника над измерительным пунктом определялось только одно значение N_c . График, составленный из подобных случайных (пусть даже верных) значений N_c , не только не характеризует высотного распределения электронной концентрации в ионосфере $N_c(z)$, но может даже создать неверное представление об этой быстро меняющейся и неоднородной области атмосферы. Наличие на таком графике каких-либо особенностей (например, максимумов) вовсе не означает, что такие особенности должны присутствовать в реальной ионосфере.

2. Точность измерения локальной электронной концентрации дисперсионным методом при помощи ИСЗ

Как известно, разность фаз $\delta\Phi$ двух когерентных колебаний с частотами ω_1 и ω_2 , приведенная к частоте ω_1 , в приближении геометрической оптики записывается в виде

$$\delta\Phi \equiv \Phi_1 - \frac{\omega_1}{\omega_2} \Phi_2 = a \int_0^{r_c} N \, dS, \quad a = \frac{\omega_1}{c} \frac{2\pi e^2}{m} \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right). \quad (1)$$

Продифференцировав (1) по времени, можно получить выражение для производной разности фаз $\delta\dot{\Phi}$, лежащее в основе дисперсионного метода измерения N_c . Это выражение запишем в форме, используемой в [6]

$$\delta\dot{\Phi} = a \left\{ -\frac{N_c \dot{z}_c}{\cos \varphi_0} + \left([\dot{N}_R] + \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \left(\dot{r}_c + \frac{\dot{z}_c}{\cos \varphi_0} \right) - \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \dot{y}_c - \int_0^{r_c} \frac{\partial N}{\partial t} \, dS \right\}, \quad (2)$$

где \dot{z}_c и \dot{y}_c — компоненты скорости ИСЗ вдоль осей z и y ; \dot{z}_c — радиальная компонента скорости; φ_0 — угол между вертикалью и лучом зрения; dS — элемент длины луча. В приближении плоской ионосферы

$$[\dot{N}_R] = \frac{1}{z_c} \int_0^{z_c} N \, dz, \quad \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] = \frac{1}{z_c \cos \varphi_0 \sin \varphi_0} \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial x} z \, dz, \\ \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] = \frac{1}{z_c \cos \varphi_0} \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial y} z \, dz.$$

Из выражения (2) следует, что экспериментально измеряемая величина $\delta\dot{\Phi}$ зависит как от локальной концентрации N_c в месте положения спутника, так и от горизонтальных градиентов ионизации $\partial N / \partial x$, $\partial N / \partial y$ и нестационарности ионосферы вдоль всего луча. Для определения N_c при помощи (2) необходимо, чтобы члены этого выражения, учитывающие горизонтальные градиенты и нестационарность ионосферы, были малы по сравнению с членом, зависящим от N_c . Работы [2—12] и основаны на

этом предположении, однако в случае использования ИСЗ оно не оправдывается. Рассмотрим в отдельности роль горизонтальных градиентов и роль нестационарности ионосферы.

Влияние горизонтальных градиентов. Согласно (2), определение N_c возможно, если одновременно выполнены условия, справедливые для стационарной ионосферы *

$$N_c \gg \left| \frac{\cos \varphi_0}{z_c} \left(\dot{r}_c + \frac{\dot{z}_c}{\cos \varphi_0} \right) \left[\frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} \right] \right|, \quad (3)$$

$$N_c \gg \left| \frac{\cos \varphi_0}{z_c} \dot{y}_c \left[\frac{\partial \tilde{N}}{\partial y} \right] \right|. \quad (3a)$$

Нетрудно видеть, что

$$\left[\frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} \right] \gg \frac{1}{z_c} \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial x} z dz \sim \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial x} dz \quad \text{и} \quad \left[\frac{\partial \tilde{N}}{\partial y} \right] \sim \int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial y} dz.$$

Поэтому для оценки градиентных членов можно использовать данные

о $\int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial x} dz$ и $\int_0^{z_c} \frac{\partial N}{\partial y} dz$, которые, согласно результатам различных экспериментов [4, 6, 9, 11, 14, 17, 20], могут лежать в пределах от 10^9 до $10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ км}^{-1}$.

Для наименьшего из приведенных значений $[\partial \tilde{N} / \partial x] \sim [\partial \tilde{N} / \partial y] \sim 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ км}^{-1}$ и при типичных для ИСЗ серии «Космос» скоростях $\dot{z}_c \sim 0,5$ и $\dot{r}_c \sim \dot{y}_c \sim 5 \text{ км/сек}$ неравенства (3) требуют, чтобы было $N_c \gg 10^5 \text{ см}^{-3}$. Для максимальных же значений $10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ км}^{-1}$ необходимо $N_c \gg 10^7 \text{ см}^{-3}$. Отсюда следует, что даже при наименьших из измеренных горизонтальных градиентах определение N_c возможно лишь в небольшом интервале высот, близких к максимуму области F. При максимальных известных значениях градиентов измерения N_c невозможны ни в какой части ионосферы **.

Взглянем теперь, как выполнены условия (3) в экспериментах Я. Л. Альперта и др. В обсуждаемом цикле работ [4—10], а также в [14, 12] количественные оценки горизонтальных градиентов даны только в работах [4, 6], а влияние этих градиентов на измерение N_c рассматривалось только в [6].

В работе [4] (ИСЗ «Космос») дана оценка $[\partial \tilde{N} / \partial x] \sim [\partial \tilde{N} / \partial y] \sim 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ км}^{-1}$, при этом, согласно (3), должно выполняться условие $N_c \gg 10^8 \text{ см}^{-3}$. Между тем, как видно из [4, табл. 1], найденные значения N_c не превосходили $2,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, следовательно, полученные значения N_c нельзя считать достоверными. В работе [6] горизонтальные градиенты оценены по данным ионосферных станций, отстоящих друг от друга на сотни километров. На таких расстояниях может измениться не только величина градиента, но и его знак. Кроме того, ионосферные станции позволяют находить значения градиентов лишь для нижней части ионосферы, а нигде не следует, что горизонтальные градиенты в верхней ее части такие же (например, в работе [20] обнаружены существенные градиенты именно в верхней части ионосферы). Уменьшение градиентов с высотой не вытекает и из приведенных в [6, фиг. 8] графиков $\partial N / \partial y$ от z , полученных по данным ионосферных станций. Но даже для приведенных в [6] значений $[\partial \tilde{N} / \partial y] \sim 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ км}^{-1}$ среднее значение отношения отбрашиваемого члена $a |[\partial \tilde{N} / \partial y] \dot{y}_c|$ к $|\delta \Phi|$ по 15 измерениям, приведенным в [6, табл. 4], равно 0,8, т. е. оказывается недопустимо большим.

* Для простоты член $[\tilde{N}_R]$ в условии (3) опущен, что облегчает выполнение этого условия. В действительности, при $[\tilde{N}_R] > N_c$ (что имеет место на больших высотах, например, $z > 2000 \text{ км}$) $[\tilde{N}_R]$ определяет $\delta \Phi$ в большей степени, чем N_c .

** Заметим, что для выполнения условий (3) в точке, где $\dot{r}_c + \dot{z}_c / \cos \varphi_0 = 0$, необходимы те же значения N_c , поскольку автоматическое выполнение условия (3) не облегчает выполнения условия (3a).

В результате приходим к выводу, что влияние горизонтальных градиентов ограничивает область сколько-нибудь надежного определения N_c высотами, близкими к максимуму области F . Использование спутников с вытянутой орбитой не улучшает положения, поскольку на больших высотах на точность определения N_c начинают влиять нестационарность ионосферы и малость N_c .

Влияние нестационарности ионосферы. Чтобы можно было пренебречь нестационарностью ионосферы, член $\int \frac{\partial N}{\partial t} dS$ в (2) должен быть значительно меньше члена, содержащего N_c , откуда при $\cos \varphi_0 \neq 0$ должно быть

$$N_c \gg \left| \frac{\cos \varphi_0}{z_c} \int_0^{r_c} \frac{\partial N}{\partial t} dS \right|. \quad (4)$$

Согласно полученным к настоящему времени экспериментальным данным, нестационарный член $\left| \int \frac{\partial N}{\partial t} dS \right|$ достигает значений (1—5) ·

$10^9 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ [24—25]. Положив $\left| \int \frac{\partial N}{\partial t} dS \right| = 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, $\cos \varphi_0 = 1$,

находим из неравенства (4), что надежное измерение N_c возможно, если $N_c \gg (1/z_c) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ (z_c в см/сек). При $z_c \sim 0,5-2 \text{ км/сек}$ (спутники «Космос» и «Электрон») необходимо $N_c \gg (0,5-2,0) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, нестационарность ионосферы налагает на измерения N_c несколько меньшие ограничения, чем горизонтальные градиенты. Однако вклад нестационарности в N_c становится преобладающим при измерениях на больших высотах, когда именно условие (4) препятствует измерению N_c дисперсионным методом (на это указывалось еще в [13]). Происходит это потому, что с ростом высоты локальная концентрация N_c уменьшается, вследствие чего точность измерения N_c падает (вопреки необоснованному утверждению Я. Л. Альперта в [7], где говорится, что член уравнения (2), содержащий N_c , «...будет в нем главным именно в опытах на далеких расстояниях от Земли...»). Приведенное выше условие для спутников типа «Космос» и «Электрон» ($N_c \gg (0,5-2,0) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$) ограничивает допустимую область измерений высотами $z_c < 800-1600 \text{ км}$, где $N_c \gg 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, выше которой измерения N_c невозможны даже в отсутствие горизонтальных градиентов. Ясно, что измерение N_c дисперсионным методом на расстояниях в несколько радиусов Земли (как это предлагается в [5]) лишено всякого смысла, поскольку при $N_c \leq 10^2 \text{ см}^{-3}$ для выполнения неравенства (4) потребовались бы скорости $z_c \geq 100 \text{ км/сек}$.

Отметим здесь неправильность еще одного утверждения в [7], где говорится, что роль нестационарного члена $\int \frac{\partial N}{\partial t} dS$ мала, потому, что «... $\int \frac{dN}{dt} dS$ есть медленно

меняющаяся функция времени t по сравнению с другими членами (1)...» (по нашей нумерации — (2)). Ведь при определении N_c из (2) важна не относительная скорость изменения, а абсолютная величина отдельных членов в (2). Поэтому приводимые в работах [7, 9, 10] соображения о медленности изменения $\int \frac{\partial N}{\partial t} dS$ не являются основанием для пренебрежения нестационарностью ионосферы.

Ошибки определения N_c методом парных уравнений. В работах [8, 9] N_c определялось только в точках, где $\dot{r}_c + \dot{z}_c / \cos \varphi_0 = 0$, в которых выражение (2) позволяет непосредственно связать N_c и $\delta\Phi$ в пренебрежении чле-

нами с $\partial N / \partial y$ и $\partial N / \partial t$. В работах же [4, 6] значения N_c определялись для произвольных точек орбиты путем решения «цепочки уравнений». Рассмотрим и этот способ определения N_c .

Допустим, как и в [6], что горизонтальный градиент ионизации $\partial N / \partial y$ и нестационарность ионосферы не дают заметного вклада в $\delta\Phi$ и отбросим соответствующие члены в (2). Тогда в точках, где $\dot{r}_c + \dot{z}_c / \cos \varphi_0 \neq 0$, из (2)

$$\delta\Phi = a \left\{ -\frac{N_c \dot{z}_c}{\cos \varphi_0} + N_R \left(\dot{r}_c + \frac{\dot{z}_c}{\cos \varphi_0} \right) \right\} \quad (5)$$

с двумя неизвестными N_c и $N_R \equiv [N_R] + [\partial N / \partial x]$. (в точках, где $\dot{r}_c + \dot{z}_c / \cos \varphi_0 = 0$, член с N_R выпадает и получается одно уравнение с одним неизвестным N_c). В работах [4, 6] на величины N_c и N_R налагается требование постоянства на интервале Δt между двумя отсчетами $\delta\Phi$, после чего записывается уравнение (5) для моментов времени t и $t + \Delta t$ и из получившейся пары уравнений с двумя неизвестными однозначно определяются N_c и N_R . Примерно так же определяется N_c в [11, 12].

Сама постановка задачи об однозначном определении N_c и N_R из одного уравнения (5) при наложении на N_c и N_R дополнительного условия (в данном случае — условия постоянства N_c и N_R на интервале Δt) не вызывает у нас никаких возражений (которые приписываются нам в [7]), поскольку дополнительное условие выполняет в известном смысле роль второго уравнения для N_c и N_R . Возражение вызывает то обстоятельство, что в работах [4, 6] не сформулированы количественные условия медленности, при выполнении которых N_c и N_R , определяемые приближенным методом парных уравнений, близки к истинным значениям, и не проверено, выполняются ли эти условия в действительности. Между тем есть основания считать, что в условиях реальной ионосферы N_c и N_R меняются недостаточно медленно для того, чтобы метод парных уравнений был применим.

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим следующий пример. Примем, что ионосфера стационарна и плоскослойна ($N = N(z)$, $\partial N / \partial t = \partial N / \partial x = \partial N / \partial y = 0$) и что зависимость $N(z)$ и движение ИСЗ заданы. По заданным значениям N_c и координат ИСЗ вычислим при помощи (5) функцию $\delta\Phi(t)$ и, используя эту функцию, решим обратную задачу — определим локальную концентрацию N_c методом парных уравнений, после чего сравним получившиеся значения с исходными. Такой расчет был проведен нами для типичных значений параметров: а) орбита спутника лежит в плоскости (x, z) , причем в момент $t = 0$ спутник находится в точке $z_0 = 400$ км, $x_0 = -300$ км, а компоненты его скорости равны $\dot{z}_0 = 0,5$ км/сек, $\dot{x}_0 = 8$ км/сек и постоянны в интервале 0—10 сек; б) при $z > z_0$ концентрация $N(z)$ убывает по экспоненциальному закону $N(z) = 3 \cdot 10^5 \exp[-(z - z_0) / h]$ см⁻³, где $h = 200$ км; в) интегральная концентрация до высоты z_0 равна $\int_0^{z_0} N(z) dz = 4,5 \cdot 10^{12}$ см⁻². Расчет по

методу парных уравнений (уравнения были составлены для моментов $t = 0$ и $t = 10$ сек, т. е. взят интервал принятый в [4]) дал $N_c = 1,62 \cdot 10^5$ см⁻³, в то время как для $t = 5$ сек. (середина интервала) истинное значение $N_c = 2,96 \cdot 10^5$ см⁻³, т. е. относительная ошибка равна 45% (изменение орбиты ИСЗ и уменьшение интервала Δt несущественно влияют на погрешность определения N_c). Столь высокая ошибка обусловлена именно тем, что в рассмотренном примере не выполнены условия медленности изменения N_c и N_R .

Для уравнения (5), записанного в виде $A(t)x(t) + B(t)y(t) = F(t)$, условия медленности можно сформулировать следующим образом. Если $x(t)$ и $y(t)$ — истинные значения каких-либо двух физических величин, а $\bar{x}(t)$ и $\bar{y}(t)$ — значения, определенные из системы парных уравнений

$$A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{y}(t) = F(t), \quad A(t + \Delta t)\bar{x}(t) + B(t + \Delta t)\bar{y}(t) = F(t + \Delta t), \quad (6)$$

то относительные ошибки $|(x - \bar{x}) / x|$ и $|(y - \bar{y}) / y|$ при $\Delta t \rightarrow 0$ будут малыми только при выполнении неравенств*

* Аналогичные условия в [11], имеющие в наших обозначениях вид $\Delta x / x \ll \ll \Delta A / A, \Delta y / y \ll \Delta B / B$, менее точны.

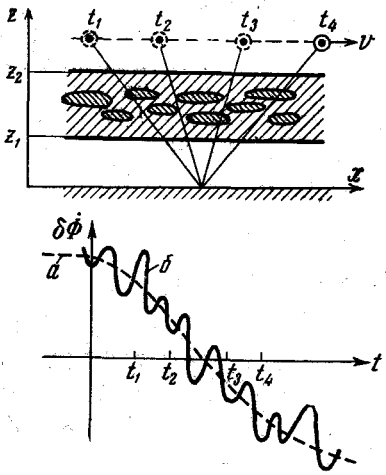
$$\left| \frac{x - \bar{x}}{x} \right| = \left| \frac{B Ax' + By'}{x A'B - B'A} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{y - \bar{y}}{y} \right| = \left| \frac{A Ax' + By'}{y A'B - B'A} \right| \ll 1, \quad (7)$$

где A, B, A', B' относятся к моменту t . Условия (7) должны выполняться при любых сколь угодно малых Δt .

Из (7) видно, что погрешность в определении x и y методом парных уравнений будет мала при медленном изменении $x(t)$ и $y(t)$ (малость производных $x'(t)$ и $y'(t)$). В рассмотренном выше примере определения N_c методом парных уравнений неравенства (7) не выполняются, причем расчет ошибки $|(N_c - \bar{N}_c) / N_c|$ при помощи (7) как раз и дает указанную выше цифру 45%. В реальных условиях эта ошибка может быть и меньше и больше. Однако существенно здесь то, что при реальных измерениях не представляется возможным проверить справедливость предположения о медленности изменения N_c и N_R , а значит, нельзя убедиться в надежности полученных значений N_c .

Изложенные аргументы приводят к выводу о невозможности надежного определения N_c дисперсионным-методом при помощи ИСЗ. Этот вывод и был сделан нами в [1], но в возражениях Я. Л. Альперта он приобрел следующий вид: «... в итоге аргументы, приводимые в [1], сводится к утверждению, что нельзя определять локальное значение электронной концентрации N_c в результате обработки непрерывных записей разности доплеровских смещений частоты $\delta\Phi(t)$ двух когерентных радиоволн» [7].

Цитируемое резюме нашей точки зрения неверно по двум причинам. По-первых, наше утверждение является не аргументом, а выводом, который основан на аргументах, изложенных выше, а также ранее в [1] и, кстати сказать, не опровергнутых в [7]. Во-вторых, мы считаем, что надежно определять N_c из непрерывных записей $\delta\Phi(t)$ нельзя отнюдь не во всех случаях, а только при существенной горизонтальной скорости излучателя. Например, при опытах с вертикально запускаемыми геофизическими ракетами определение N_c дисперсионным методом вполне возможно, что подтверждается многочисленными работами, в том числе и нашими [13, 26].



Фиг. 1

Приведем простой пример «...основанный на физическом понимании сути используемого метода измерений $\delta\Phi$ и свойств ионосферы» [7]. Пусть спутник летит над ионизированной областью, расположенной между высотами z_1 и z_2 (фиг. 1), причем возле спутника локальная концентрация $N_c = 0$. Видно, что дисперсионные измерения в этом случае дадут запись $\delta\Phi(t)$, обладающую всеми характерными особенностями записей $\delta\Phi(t)$, полученных в работах [4, 6, 8—12]. В случае горизонтально однородной ионосферы ($\partial N / \partial x = \partial N / \partial y = 0$) $\delta\Phi$ будет меняться плавно и, пройдя через нуль, изменит знак (фиг. 1, кривая а). Если же ионизированная область содержит неоднородности, то ход кривой $\delta\Phi(t)$ будет нерегулярным в соответствии с характером неоднородностей на пути распространения радиоволн (фиг. 1, кривая б). Разумеется, вид записи $\delta\Phi(t)$ может меняться в широких пределах. Обработывая полученные в нашем примере записи $\delta\Phi(t)$ на основе сделанного в [6, 10, 27] предположения, что «...каждое квазипериодическое изменение $\delta\Phi(t)$, регистрируемое в виде непрерывной записи $\delta\Phi(t)$, главным образом и наиболее часто вызвано изменением локальной концентрации, т. е. при пересечении излучателем неоднородного образования вдоль орбиты ИСЗ» [10], мы получили бы какие-то значения $N_c \neq 0$, в то время как по предположению $N_c = 0$.

Рассмотренный пример иллюстрирует наш главный вывод — о невозможности в случае опытов с ИСЗ надежно определить N_c и разделить вклады отдельных факторов в регистрируемую при дисперсионных измерениях величину $\delta\Phi^*$. Такое заключение уже высказывалось и в работах [14, 17—19].

3. Интерпретация результатов измерений

Помимо того, что полученные в [4, 6, 8, 9] значения N_c вызывают сомнения, существенные возражения вызывает и способ использования этих данных для построения графиков в указанных работах и сделанные в них выводы. Поэтому мы хотели бы обратить внимание еще на некоторые неверные положения в обсуждаемых работах [4, 6, 8, 9] **.

Высотно-временные распределения $N_c(z, t)$ и их максимумы. В работе [8] найденные значения N_c представляются в виде единого высотного хода электронной концентрации, причем каждая кривая строится по значениям N_c , полученным в различные дни, различное время и над различными географическими пунктами (за один пролет спутника получается только одно значение N_c , т. е. одна или, максимум, две точки на кривой $N_c(z, t)$ в сутки) ***. Так, например, одна из кривых фиг. 5 в работе [8], охватывающая высоты от 431 до 1215 км, построена по 40 точкам за 37 дней (с 18.II по 25.III 1964 г.) в интервале от 9 до 18 час., причем, как следует из табл. 1 этой работы, удаление по горизонтали x_c достигало 1006 км. В условиях реальной ионосферы, являющейся существенно неоднородной и нестационарной средой, набор таких разрозненных экспериментальных точек N_c , соединенных с одной кривой, никак не может характеризовать истинные свойства ионосферы и не позволяет выделить какие-либо «пространственные закономерности» ионосферы, подобные выявляемым в [6, 8, 9].

В работе [8] в обоснование правомерности кривых $N_c(z, t)$ говорится: «Если по каким-либо причинам, в частности рассматриваемым ниже, в определенных локально расположенных областях ионосферы время от времени в течение коротких периодов времени возникает избыточное по сравнению с невозмущенным значением N_c количество электронов, или одновременно в двух смежных областях в одной возникает сгущение, а в примыкающей к ней области — разрежение электронов, то при длительных измерениях можно измерить эту пространственную закономерность. Возможно, что зависимость $N_c(z, t)$ выявляет наличие такой постоянно действующей по высоте, но не обязательно постоянно действующей по времени локальной изменчивости электронной концентрации».

Здесь содержатся по крайней мере два неверных утверждения. Во-первых, если речь идет о длительных наблюдениях, во время которых обнаруживаются кратковременные события (подобные, например, спорадическим образованиям типа слоя E_s), то в паузах между этими событиями должны регистрироваться значения, соответствующие нормальному невозмущенному состоянию среды, причем на паузы должно падать значительно большее число измерений, чем на периоды, отвечающие кратковременным исключительным условиям. Однако такие «невозмущенные» точки [8, рис. 5] *полностью отсутствуют* — все определенные в одном пункте значения N_c ложатся на одну квазипериодическую по высоте кривую; чис-

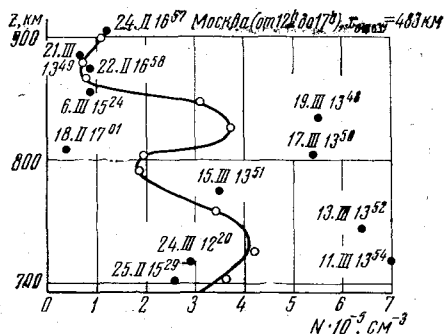
* Эти наши соображения аналогичны замечаниям А. Н. Крылова о влиянии разного рода факторов на результаты измерений [28, стр. 389].

** Мы не ставим своей целью рассмотрение всех неверных положений в работах [4, 6, 8, 9], а останавливаемся лишь на тех, которые имеют отношение к обсуждаемому вопросу о возможности дисперсионных измерений.

*** Заметим, что хотя высотно-временное распределение $N_c(z, t)$ должно зависеть от двух аргументов — z и t , зависимость от времени t никак не отображена на графиках $N_c(z, t)$ в работах [8, 9].

ло точек в минимумах примерно соответствует числу точек в максимумах кривой, а также числу точек между максимумами и минимумами. Этого безусловно не должно было бы быть при *длительных наблюдениях кратковременных явлений*. Во-вторых, нельзя применять термин «длительные наблюдения» к наблюдениям, описываемым в [8]. В самом деле, за 1,5 месяца в Москве было определено всего 40 значений N_c , относящихся к различным высотам (от 431 до 1215 км). Ясно, что из-за немногочисленности полученных точек, относящихся к большому интервалу времени и к различным высотам, такие наблюдения следует называть не *длительными*, а *эпизодическими наблюдениями в течение длительного интервала времени*.

Однако хотя кривые $N_c(z, t)$ не характеризуют реальные свойства ионосферы, но на их основе в работах [6, 8, 9] делаются далеко идущие выводы. Так, в [8] говорится: «Изображенный на фиг. 5 высотный ход $N_c(z, t)$ для совокупности индивидуальных значений N_c , соответствующих



Фиг. 2

не только различным высотам z_c , но и различным значениям горизонтальных координат (x_c, ψ_c) и времени t_c как в течение дня, так и в течение месяца, привел, как мы видим, к *качественно новому характеру зависимости электронной концентрации от высоты* (курсив наш). Такого рода качественно новые результаты содержатся, в частности, в работе [6], где было сообщено об обнаружении нового максимума ионизации, достигающего 90—95% от максимума области F и расположенного на 120—140 км выше последнего. Наличие этого максимума подтверждается в работах [8, 9], в которых сообщается также об обнаружении ряда чередующихся максимумов и минимумов, повторяющихся через 120—160 км. Кроме того, максимум ионизации на высоте ~650 км обнаружен авторами работы [12].

По поводу нового максимума ионизации в работе [6] говорится: «...нам неизвестны результаты других измерений, в которых наблюдался бы аналогичный максимум», откуда ясно, что речь идет об открытии ранее неизвестного явления природы. Естественно, что такого рода явления требуют самого пристального внимания, тем более, что они имели бы и прикладное значение (например, для радиосвязи между ИСЗ).

Рассмотрим путь, которым авторы работ [8, 9] пришли к обнаружению квазипериодической структуры ионосферы.

На фиг. 2 приведен двухсоткилометровый участок кривой $N_c(z, t)$ [8, фиг. 5], построенный по данным наблюдений в Москве. Здесь нанесены также первичные экспериментальные точки (черные кружки) из табл. 4 [8]; рядом с ними указаны дата и время измерений в 36-дневный период (с 18. II по 24. III 1964 г.). Видно, что из 12 сильно разбросанных экспериментальных точек авторы [8] посредством некоторой, не описанной детально процедуры «перекрестного осреднения» получили 10 «осредненных» точек. Именно эти «осредненные» точки (белые кружки) использованы для построения сплошной кривой $N_c(z, t)$. Аналогично в [8] обработаны все первичные данные, кроме данных, полученных в Новосибирске, которые без указанной обработки точно легли на график, построенный по «осредненным точкам». Никакого объяснения этому в [8] не содержится.

Физический смысл «осредненных» значений N_c не ясен. Если каждое первичное экспериментальное значение N_c соответствует некоторой опре-

деленной точке пространства и определенному моменту времени, то чему соответствует среднее из двух значений N_c , измеренных, например, 17.III в 13 ч. 50 м. и 18.II в 17 ч. 01 м.? Вряд ли следует выяснять смысл такого «осредненного» значения N_c , если учесть к тому же, что экспериментальные точки получены над разными географическими пунктами, отстоящими более чем на 400 км, и при совершенно различных состояниях ионосферы в целом (что видно из разброса значений N в максимуме области F [8, табл. 4]).

Таким образом, как сами кривые $N_c(z, t)$, так и их максимумы лишены физического смысла, и поэтому для их объяснения нет нужды привлекать ряд ничем не аргументированных гипотез — типа предположений о «стоячих плазменных волнах», о «слоисто-квазипериодической структуре процессов в ионосфере» и др. [8]. Эта точка зрения подкрепляется и тем, что ни в одном из многочисленных экспериментов по определению высотного хода электронной концентрации, выполненных различными методами, новые максимумы выше максимума области F обнаружены не были (см. ниже).

Об определении спектра неоднородностей. Хотя данная статья посвящена вопросу о возможности нахождения локальной концентрации N_c , нельзя не сделать нескольких замечаний по поводу определения спектра неоднородностей из записей $\delta\Phi(t)$.

При определении локальной концентрации в работах [4, 6, 8, 9] используются *сглаженные кривые* $\delta\Phi(t)$. В действительности же кривые $\delta\Phi(t)$ испытывают более или менее значительные вариации, из анализа которых в работах [4, 6, 10], а также в [27] находится спектр неоднородностей в ионосфере. Однако и здесь в основу анализа положено цитированное ранее на стр. 438 бездоказательное предположение о том, что вариации $\delta\Phi$ вызваны главным образом изменением локальной концентрации вдоль орбиты ИСЗ. Это предположение вовсе не очевидно*. Из основной формулы (2) видно, что вариации $\delta\Phi$ в равной степени могут вызываться как изменениями N_c , так и изменениями величин $[N_R]$, $[\partial N / \partial x]$, $[\partial N / \partial y]$. Поэтому любая неоднородность, встретившаяся на пути распространения волны от излучателя на ИСЗ к приемному пункту, независимо от высоты, на которой она расположена, скажется на регистрируемой величине $\delta\Phi$. Достаточно представить себе несколько спутников, обращающихся вокруг Земли по орбитам, расположенным на разных высотах, но движущихся, вопреки законам механики, синхронно относительно наблюдательного пункта, находясь в *каждый* момент на одном и том же луче зрения. В этом мысленном эксперименте одна и та же неоднородность, расположенная ниже всех спутников, должна, согласно [4, 6, 10, 27], приписываться одновременно нескольким различным высотам. Отсюда очевидна бессмысленность сделанного в работах [4, 6, 10, 27] предположения о том, что главным образом ионосферные неоднородности вдоль орбиты вызывают вариации $\delta\Phi$ **.

При подобном предположении нельзя правильно определить ни спектр размеров неоднородностей, ни величины относительных флуктуаций электронной концентрации $\Delta N_c / N_c$.

* Как пример другого толкования записей $\delta\Phi(t)$, укажем на работу [29], в которой считается, что вариации $\delta\Phi(t)$ обусловлены изменениями во всей толще ионосферы ниже спутника (см. также [1]).

** Заметим, что в работе [30] на основе анализа флуктуаций амплитуды радиосигналов с ИСЗ, принятых на разнесенных пунктах, сделан вывод, что неоднородности ионосферы расположены главным образом вблизи максимума области F (работы [4, 6, 10, 27] и работа [30] основаны на наблюдениях одних и тех же сигналов с одних и тех же ИСЗ).

4. Сравнение данных, полученных различными методами

Учитывая сказанное в разделах 2 и 3 о точности определения N_c в работах [6, 8, 9, 11, 12], можно было бы и не затрагивать здесь вопрос о сопоставлении кривых $N_c(z, t)$ с данными других опытов, хотя подобное сравнение в работах [6, 8, 9, 11, 12] безусловно было бы уместно. Казалось бы, авторы указанных работ, обнаружив новые максимумы ионизации, должны были попытаться найти причину столь разительных расхождений с результатами других опытов, в частности причину отсутствия второго максимума ионизации с $N \sim 0,9 \div 0,95 N_{\max F}$ в результатах измерений другими методами. Однако обо всех опытах, кроме дисперсионных опытов на ИСЗ, в [7] сказано, что в них «определяется другая величина локального значения электронной концентрации, чем в работах [1—7]» (по нашей нумерации [2—6]), поскольку «значения N_c , определяемые в наших опытах, характеризуют очень малую область ионосферы с линейными размерами порядка длины волны», тогда как «в большинстве опытов, описанных в литературе, принципиально в самом методе измерений или методе их обработки заложен элемент осреднения N по большим областям». Но это неверно. В продольном направлении (вдоль орбиты ИСЗ) размеры области усреднения для дисперсионных опытов в [4, 6, 8—12] не порядка длины волны λ , как сказано в [7], а порядка нескольких километров или десятков километров, поскольку при определении N_c используются сглаженные кривые $\delta\Phi(t)$, на которых усреднены вариации N_c с пространственными размерами именно такого порядка.

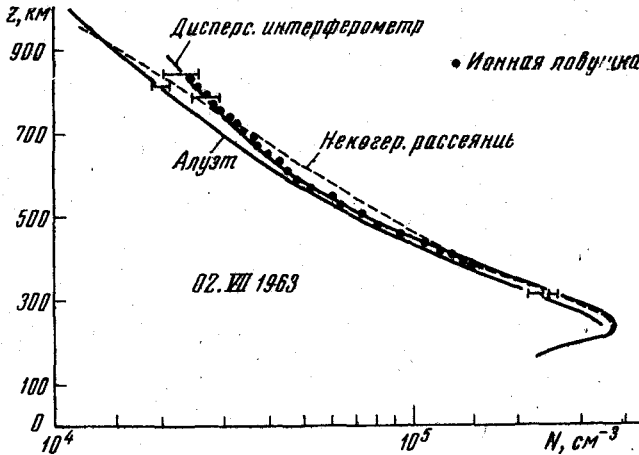
Что же касается поперечного размера области усреднения, который при дисперсионных измерениях порядка λ , то при зондовых измерениях он существенно меньше, чем $\lambda \sim 3$ м ($f = 90$ Мгц в опытах [4—6, 8—12]), а при опытах с некогерентным рассеянием и при импульсном радиозондировании с Земли и со спутников этот размер значительно больше $\lambda \sim 15$ м ($f = 20$ Мгц). Между тем различные эксперименты (за исключением опытов [4, 6, 8—12]) с разными размерами области усреднения дают, как это видно, например, из фиг. 3, заимствованной из [31], хорошо согласующиеся результаты (см. также [32—37]).

Таким образом, очевидно несостоятельность утверждения в [7] о неправомочности сопоставления значений N_c , полученных различными методами. Кстати, такое сопоставление данных спутниковых дисперсионных измерений с данными импульсного зондирования со спутника «Алуэт», некогерентного рассеяния и ракетных зондовых измерений без каких-либо оговорок проводилось в работах [7, 8, 10]*. Однако эти данные сравниваются в [8] не с самой кривой $N_c(z, t)$, а только с кривой, касательной к минимумам $N_c(z, t)$, и со «средней секущей зависимости $N_c(z, t)$ ». В работах же [7, 10] также сравнивается не кривая $N_c(z, t)$, а некая «сглаженно-усредненная» кривая $\bar{N}_c(z, t)$, сохранившая от кривой $N_c(z, t)$ лишь один новый максимум. Но даже и это сопоставление (см. фиг. 4, заимствованную из работы [7]; обозначения: 1 — $N_c(z, t)$, 2 — N_i^+ , 3 — некогерентное рассеяние, 4 — «Алуэт») демонстрирует принципиальное различие хода кривых (наличие на кривой $\bar{N}_c(z, t)$ двух максимумов, тогда как на других кривых имеется только один максимум). Нельзя не отметить также, что хотя кривые и находятся в «хорошем согласии на высотах $z > 1200$ км», на высотах $z < 1200$ км значения N расходятся в 20 раз**.

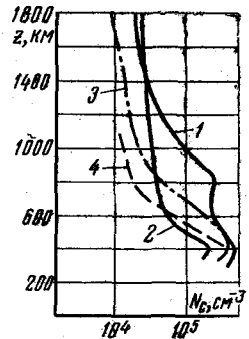
* Проведенное в [6] сопоставление с данными наземных ионосферных станций здесь не рассматривается. Отметим только значительное расхождение данных ионосферных станций с данными дисперсионных измерений при помощи ИСЗ (см. [1]).

** Замечание в [7] об ошибочности описанных в работе [38] (ссылка [16] в [7]) результатов измерений на высотах 1200—2000 км вызывает удивление, поскольку в работе [38] вообще нет речи об этих высотах.

Отметим, что глубокий минимум на графике $N_c(z, t)$, отмеченный в [8] как важное свойство этой кривой и обнаруженный на высоте 620—630 км над Москвой, Свердловском и Новосибирском, приходится на максимум ионизации, обнаруженный на этой высоте (~ 650 км) над Харьковом авторами работы [12], причем в работе [12] не обнаружено ника-



Фиг. 3



Фиг. 4

кой «квазипериодической структуры» на высотах до 1800 км. Это также не может не вызвать недоумения.

Итак, сопоставление высотно-временных зависимостей $N_c(z, t)$ с данными других опытов показывает, что только кривые $N_c(z, t)$ имеют квазипериодическую структуру со многими максимумами. Учитывая точность кривых $N_c(z, t)$ (см. разделы 2 и 3), мы считаем, что если бы даже максимумы N действительно существовали в верхней ионосфере, то дисперсионные измерения при помощи ИСЗ, описанные в [2—12], наименее пригодны для их выявления.

В заключение мы хотели бы выразить сожаление по поводу того, что Я. Л. Альперт в [7] явно уходит от обсуждения рассматриваемого вопроса по существу. Например, по поводу нашего анализа в [1] роли горизонтальных градиентов он ограничивается замечанием, что этот аргумент очевиден. Мы с этим вполне согласны, но не считаем, что очевидность аргумента делает его порочным и позволяет его игнорировать. Казалось бы, наоборот, если против какой-либо концепции выдвигается очевидный аргумент, то тем настоятельнее защитник концепции должен стремиться опровергнуть этот аргумент по существу. Позиция же, занятая автором [7], вряд ли способствует установлению истины.

Изложенное выше позволяет сделать основные выводы.

1. Точность определения электронной концентрации в ионосфере N_c дисперсионным методом при помощи когерентных радиоволн, излученных со спутников, весьма низка из-за влияния неоднородности и нестационарности ионосферы. Поэтому определяемые таким методом значения N_c ненадежны. По мере увеличения высоты над максимумом области F ионосферы погрешность определения N_c возрастает, так как вклад N_c в измеряемую величину $\delta\Phi$ падает из-за уменьшения N_c , тогда как вклад нестационарности ионосферы не убывает.

2. Ни данные самих дисперсионных измерений, ни данные наземной сети ионосферных станций не позволяют оценить погрешность определения N_c в каждом конкретном случае.

3. Определение локальной концентрации дисперсионным методом при помощи ИСЗ нецелесообразно, поскольку существуют другие, более надежные методы определения N_c . Разумеется, это не означает ненужности излучения с ИСЗ когерентных радиоволн, которые позволяют получить ряд других ценных сведений об ионосфере (например, об интегральной концентрации и ее вариациях, а также об ионосферных неоднородностях).

4. В силу отмеченной выше ненадежности значений N_c , полученных указанным методом, выводы, сделанные в работах [4, 6, 8—12], представляются недостоверными. В этих работах нет сколько-нибудь обоснованного анализа точности измерений и нет ряда необходимых для такого анализа сведений. Приводимые же в этих работах численные данные не свидетельствуют о соблюдении условий, при которых определение N_c возможно.

5. Изображение в виде единой высотной зависимости значений N_c , полученных во время единичных, эпизодических измерений в различные дни, в различное время суток и над разными географическими пунктами, незаконно. Такая зависимость лишена физического смысла.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, Ю. А. Кравцов, В. А. Рудаков, С. М. Рытов. Геомагн. и аэронавигация, 1965, 5, № 4, 762.
2. Я. Л. Альперт. Успехи физ. наук, 1958, 64, № 1, 3.
3. Я. Л. Альперт. Успехи физ. наук, 1960, 71, № 3, 369.
4. Я. Л. Альперт, В. Б. Белянский, Н. А. Митяков. Геомагн. и аэронавигация, 1963, 3, № 1, 3.
5. Я. Л. Альперт, В. Б. Белянский, А. Ф. Кутяков. Геомагн. и аэронавигация, 1963, 3, № 1, 167.
6. Я. Л. Альперт. Геомагн. и аэронавигация, 1964, 4, № 3, 479. См. также Ja. L. Alpert. On the results of ionosphere investigation with the help of coherent radio waves emitted by the satellites. Paper presented at COSPAR Symposium, Florence, 1964; Ja. L. Alpert. Space Sci. Rev., 1965, 4, № 1, 5.
7. Я. Л. Альперт. Геомагн. и аэронавигация, 1965, 5, № 4, 766.
8. Я. Л. Альперт, В. М. Синельников. Геомагн. и аэронавигация, 1965, 5, № 2, 209.
9. Я. Л. Альперт, В. М. Синельников. Сб. «Исследования космического пространства», Изд-во «Наука», 1965, 123.
10. Я. Л. Альперт, Л. Н. Витшас, В. М. Синельников. Геомагн. и аэронавигация, 1965, 5, № 4, 649.
11. В. А. Мисюра, Г. К. Солодовников, В. М. Мигунов. Космические исследования, 1965, 3, № 4, 595.
12. В. А. Мисюра, Г. К. Солодовников, Е. В. Крохмальников, В. М. Мигунов. Сб. «Исследования космического пространства», Изд-во «Наука», 1965, 138.
13. К. И. Грингауз, В. А. Рудаков. Сб. «Искусственные спутники Земли», № 6, Изд-во АН СССР, 1961, 48.
14. Н. А. Митяков, Э. Е. Митякова. Геомагн. и аэронавигация, 1963, 3, № 5, 858.
15. W. J. Ross. J. Geophys. Res., 1960, 65, № 9, 2604; 2607.
16. F. de Mendonça. J. Geophys. Res., 1962, 67, № 6, 2315.
17. Л. М. Ерухимов, Н. А. Митяков, Э. Е. Митякова. Сб. «Исследования космического пространства», Изд-во «Наука», 1965, 147.
18. O. K. Garriott. В кн. Electron density profiles in the ionosphere and exosphere. Pergamon Press, 1962. (русск. пер.: Распределение электронной концентрации в ионосфере и экзосфере. Изд-во «Мир», 1964, 256).
19. K. Rawer. Space Sci. Rev., 1964, 3, № 3, 380.
20. J. H. Chapman. A survey of topside sounding of the ionosphere. Paper presented at the XIV General Assembly URSI, Tokyo, 1963.
21. Physics of the upper atmosphere (ed. J. A. Ratcliffe). Academic Press (русск. пер.: Физика верхней атмосферы. Физматгиз, 1963).
22. J. V. Evans. Proc. Phys. Soc., 1956, 69B, № 441, 953.
23. В. В. Виткевич, Ю. Л. Кокурин. Радиотехника и электроника, 1958, 3, № 1, 1373.
24. Y. Nakata. Rept. Ionosphere Space Res. Japan, 1965, 19, № 1, 51.
25. O. K. Garriott, F. L. Smith, P. C. Yuen. Planet. Space Sci., 1965, 13, № 8, 829.
26. В. А. Рудаков. Космические исследования, 1964, 2, № 6, 946.
27. Е. Е. Цеделина, А. А. Харьбина. Геомагн. и аэронавигация, 1964, 4, № 3, 503.
28. А. Н. Крылов. Мои воспоминания. Изд-во АН СССР, 1945.

29. В. А. Мисюра, Г. К. Солодовников, В. М. Мигунов. Геомagn. и аэрoнoмия, 1964, 4, № 6, 1124.
30. Л. М. Ерухи мoв. Кoсмические исследования, 1965, 3, № 4, 584.
31. S. J. Bauer, L. J. Bluml, J. L. Donley, R. J. Fitzenreiter, J. E. Jackson. J. Geophys. Res., 1964, 69, № 1, 186.
32. Electron density profiles in the ionosphere and exosphere (ed. V. Mehlum). Pergamon Press, 1962. (русск. пер.: Распределение электронной концентрации в иoнoсфере и экзoсфере. Изд-во «Мир», 1964).
33. Electron density distribution in the ionosphere and exosphere (ed. E. Thrane). North-Holland Publ., 1964.
34. R. E. Bourdeau, J. Chapman, K. Maeda. Paper presented at XIV General Assembly URSI, Tokyo, 1963 (русск. пер.: Кoсмические исследования, 1965, 3, 42).
35. Б. Н. Гoрoжанкин, В. А. Рудаков. Сб. «Исследования кoсмического прoстранства», Изд-во «Наука», 1965, 168.
36. К. И. Грингауз, Г. Л. Гдалевич. Сб. «Искусственные спутники Земли», № 13. Изд-во АН СССР, 1962, 89.
37. W. W. Verning. J. Geophys. Res., 1960, 65, № 9, 2589.
38. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Oзерoв. Сб. «Искусственные спутники Земли», № 6, Изд-во АН СССР, 1961, 63.

Радиотехнический институт
АН СССР

Статья поступила
27 октября 1965 г.

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Уважаемая редакция!

Для того чтобы предупредить неправильное толкование читателями журнала отсутствия моего ответа на напечатанную выше статью К. И. Грингауза, Ю. А. Кравцова, В. А. Рудакова и С. М. Рытова, сообщаю о следующем:

Указанная статья по своему содержанию фактически соответствует уже напечатанной статье этих авторов в журнале «Геомagnetизм и аэрoнoмия» 1965, № 4, 762. В том же номере журнала были напечатаны мои замечания к статье этих авторов.

Содержание статьи 4-х авторов элементарно и в своей основе ошибочно. В ближайшее время будет напечатана статья и ответ В. А. Мисюры, Г. К. Солодовникова и В. М. Мигунова на аналогичную статью 4-х авторов по поводу их работ, где в частности также показана несостоятельность так называемых замечаний 4-х авторов.

Я. Л. Альперт

От редакции. Напечатав (на стр. 568—580) статью К. И. Грингауза, Ю. А. Кравцова, В. А. Рудакова и С. М. Рытова и письмо Я. Л. Альперта, присланное в связи с этим, редакция полагает, что читатели теперь имеют достаточно материала (см. также журнал «Геомagnetизм и аэрoнoмия» № 4, стр. 762—768 за 1965 г.), чтобы определить свое отношение к мнениям, изложенным в ходе дискуссии. В соответствии с этим дальнейших публикаций в журнале по данной дискуссии не будет.